

یک مدل نیمه تجربی به منظور تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای

جمال عباس پلنگی* و علی محمد آخوند علی^۱

(تاریخ دریافت: ۸۵/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۶/۱۸)

چکیده

در هنگام طراحی یک سیستم آبیاری قطره‌ای لازم است الگوی خیس شدن نیمرخ خاک که اصطلاحاً به آن پیاز رطوبتی گفته می‌شود برای هر زمینی که قرار است با روش قطره‌ای آبیاری شود، از قبل مشخص گردد. شکل الگوی رطوبتی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در انتخاب قطره‌چکان می‌باشد و روی حجم آب آبیاری مؤثر است. فاصله قطره‌چکان‌ها نیز براساس شکل الگوی رطوبتی و مساحتی که هر قطره‌چکان اشغال می‌کند انتخاب می‌شود. ابعاد پیاز رطوبتی تحت تأثیر پارامترهای مهمی همچون خصوصیات هیدرولیکی خاک، دبی خروجی قطره‌چکان و زمان آبیاری می‌باشد. به منظور تخمین شکل جبهه رطوبتی ناشی از یک منبع نقطه‌ای این پژوهش در منطقه الباجی واقع در ۲۵ کیلومتری جاده اهواز- اندیمشک و خاکی با بافت شنی صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا قطره‌چکان‌ها برای تأمین دبی‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت کالیبره شدند. سپس آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین حداکثر قطر و عمق پیاز رطوبتی در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری به ازای هر دبی انجام گرفت. در نهایت روابطی نیمه تجربی با تأثیر عوامل فیزیکی حاکم بر پیشروی آب در خاک در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای و قضیه π باکینگهام و آنالیز ابعادی به دست آمد. این روابط با استفاده از الگوهای رطوبتی به دست آمده واسنجی شده و به منظور صحت سنجی آن، روابط علمی- تجربی به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مطالعه انجام شده و حداکثر خطای نسبی ۱۴/۳ درصد و حداکثر جذر میانگین مربعات خطای ۳/۸ سانتی‌متر در پیش‌بینی قطر و عمق جبهه رطوبتی، معادلات به دست آمده که مبتنی بر نتایج آزمایش‌های میدانی نیز می‌باشند، با دقت بالایی ابعاد هندسی پیاز رطوبتی را برآورد می‌کنند و می‌توان از آنها در طراحی و مدیریت بهینه سیستم آبیاری قطره‌ای برای شرایط مورد مطالعه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، منبع نقطه‌ای، جبهه رطوبتی، آنالیز ابعادی

مقدمه

آنچه باعث پایین بودن بازده آبیاری است مسائل و مشکلات داخل مزرعه و در ارتباط با روابط آب و خاک و گیاه است که مسئولیت آن متوجه زارع نبوده بلکه متخصصان آبیاری و کشاورزی، طراحان سیستم‌های آبیاری و حتی مدیران مزارع و کشاورزی نیز در این امر مسئولیت دارند (۳).

با تمام پیشرفت‌هایی که در علم آبیاری حاصل شده و با وجود این‌که بیش از ۸۰ درصد مصرف آب شیرین دنیا در بخش کشاورزی است، هنوز متوسط بازده آبیاری سطحی در دنیا از ۳۵ درصد تجاوز نمی‌کند (۴).

۱. به ترتیب کارشناس ارشد و استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Palangi_47@yahoo.com

از این گونه جداول امکان برآورد مساحت خیس شده در زمان‌های مختلف آبیاری وجود ندارد (۵).

معادله حاکم بر حرکت آب در خاک در حالت غیراشباع معادله ریچاردز می‌باشد، که فرم دوبعدی آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad [1]$$

که در آن، θ درصد رطوبت حجمی، h بار مکش، K هدایت هیدرولیکی، x و z به ترتیب جهت افقی و عمود بر حرکت آب و t زمان می‌باشد (۳).

در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۹ محققین بسیاری (۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۹) به تحلیل مسئله نفوذ در آبیاری قطره‌ای و تعیین شکل الگوی رطوبتی و فاصله قطره‌چکان‌ها پرداخته و راه‌حل‌های تحلیلی و عددی متعددی را با در نظر گرفتن ساده‌سازی‌ها و فرضیات متفاوت ارائه نمودند. آنجلاکیس و همکاران (۷) در یک مطالعه آزمایشگاهی توزیع آب را در نیمرخ خاک همگن در دو نوع خاک لوم رسی و شنی تحت یک منبع قطره‌ای مطالعه نمودند. آنها مدل‌ها و روش‌های گوناگون را با نتایج به دست آمده مقایسه کردند. عموماً پیشروی‌های عمودی جبهه رطوبتی محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در هر دو نوع خاک هم‌بستگی زیادی داشت ولی جبهه رطوبتی افقی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای زمان‌های طولانی دارای اختلاف فاحش بوده‌اند.

تحقیقات زیادی نیز در زمینه حل عددی و تحلیلی معادله ریچاردز انجام شده و مدل‌های عددی متفاوتی مانند CSMP، HYDRUS-2D و SWMS-2D کارایی بالایی در پیش‌بینی شکل الگوی رطوبتی و پروفیل خیس شده خاک از خود نشان داده‌اند (۸، ۹، ۱۳، ۱۷ و ۱۸). مطمئناً دقیق‌ترین و بهترین روش برای تعیین ابعاد پياز رطوبتی حل معادله ریچاردز تحت شرایط اولیه و مرزی مورد نظر می‌باشد، علی‌رغم در دسترس بودن رایانه و مدل‌های عددی گوناگونی که برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در دنیا وجود دارد به علت عدم دسترسی آسان به

روش آبیاری قطره‌ای با راندمان بالاتری نسبت به سایر روش‌های آبیاری در دنیا مرسوم شده است و به علت قابلیت‌های خاصی که دارد در برخی از شرایط خاص (مانند آبیاری در خاک‌های شنی) تنها سیستم آبیاری مناسب تلقی می‌گردد.

برای آگاهی از این که قطره چکان مورد نظر مساحت دلخواه در سطح خاک را خیس می‌کند یا نه، نیاز به مشخص بودن الگوی رطوبتی حاصله می‌باشد. بر اساس این الگوها می‌توان فاصله قطره‌چکان‌ها را تعیین نمود. به عنوان مثال در خاک‌های شنی به دلیل سرعت عمودی آب و باریک بودن الگوهای رطوبتی فاصله قطره چکان‌ها را نزدیک‌تر در نظر می‌گیریم در حالی که در خاک‌های رسی به علت حرکت افقی آب و پهن‌تر بودن الگوهای رطوبتی، فاصله قطره چکان‌ها را باید بیشتر در نظر گرفت (۶).

مدت زمان آبیاری نیز بستگی دارد به این که چه زمانی پس از شروع آبیاری جبهه رطوبتی به عمق ریشه گیاه و یا مضرری از آن برسد. فاصله خروجی‌ها، شدت جریان و زمان آبیاری قطره‌ای باید طوری طراحی گردد که حجم خاک مرطوب شده به حجم ریشه گیاه نزدیک شود. بنابراین آگاهی از شکل و حجم خاک خیس شده در زیر قطره‌چکان به منظور تأمین نیاز آبی گیاه، مدیریت بهینه و افزایش راندمان آبیاری ضروری است.

کلر و همکاران جدولی ارائه کرده‌اند که مساحت خیس شده در زیر هر قطره‌چکان را به ازای دبی ۴ لیتر در ساعت و سه نوع خاک درشت، ریز و متوسط تخمین می‌زند. نتایج آنها دارای محدودیت‌هایی می‌باشد چراکه به ازای دبی‌های کمتر یا بیشتر از مقدار مذکور سطح خیس شده غیر از مقادیر ذکر شده در جدول می‌باشد. این جدول عمق جبهه رطوبتی رامشخص نمی‌کند، علاوه بر آن جدول ارائه شده توسط آنها فقط سه گروه کلی از خاک‌ها را در نظر می‌گیرد در حالی که ۱۱ کلاس بافت خاک وجود دارد. قطر خاک خیس شده نیز به ازای یک دبی معین نسبت به زمان ثابت نیست بلکه تغییر می‌کند لذا با استفاده

مقادیر اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبوده ولی برای آبدهی ۷/۵۷ لیتر در ساعت این اختلاف معنی‌دار بوده است.

خانجانی و بارانی (۲) نیز به بررسی توزیع رطوبتی خاک زیر قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای پرداختند و سعی کردند که ابعاد هندسی پیاز رطوبتی خاک را با روش‌های مختلف به دست آورند و اندازه آن را به صورت تابعی از سایر پارامترهای گیاه و خاک محاسبه کنند. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که معادلات به دست آمده در سطح مزرعه‌ای برای مدیریت آبیاری کافی بوده و می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه برای به دست آوردن معادلات مربوطه یکسری ساده‌سازی در رابطه بین آب و خاک و گیاه صورت گرفته است.

ترابی و صدرقائن (۱) طرحی را در ۶ منطقه واقع در استان اصفهان و خراسان و در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف اجرا نمودند که بر اساس آن مدل شوارتزمن وزور را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها دلالت بر امکان استفاده موفقیت آمیز از این مدل در پیش‌بینی فاصله قطره‌چکان‌ها دارد.

میرزایی و همکاران (۵) به منظور نمونه سازی جبهه رطوبتی، روابطی را با دخالت عوامل فیزیکی مؤثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و آنالیز ابعادی به دست آوردند. در نهایت این روابط با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی شد و روابط علمی- تجربی ۳ و ۴ به دست آمد که هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها نشان داد. علاوه بر آن معادلات ارائه شده تابعی از زمان هستند و در هر زمان امکان محاسبه قطر و عمق خاک خیس شده وجود دارد.

$$d = 2/123 k_s^{(-0/08)} q^{(0/54)} t^{(0/46)} \quad [3]$$

$$z = 2/281 k_s^{(0/17)} q^{(0/42)} t^{(0/58)} \quad [4]$$

و t مدت زمان آبیاری می‌باشد.

بنابراین انجام آزمایش‌های تجربی در مزرعه و ایجاد روابطی بین بافت خاک، بده قطره چکان، حجم آب نفوذ یافته به زمین، حجم خاک خیس شده، قطر و عمق پیاز رطوبتی به منظور دستیابی به روابطی تجربی که بتواند در طراحی و

خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها و نیز فقدان نرم افزارهای شبیه‌سازی در داخل کشور، متأسفانه طراحان سیستم‌های آبیاری تمایل چندانی به استفاده از روش‌های مذکور ندارند و کمتر از این قبیل روش‌ها برای به دست آوردن ابعاد پیاز رطوبتی و یا تعیین پروفیل خاک خیس شده استفاده می‌کنند.

شوارتزمن و زور (۱۶) از اولین کسانی بودند که به منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی و در نهایت تعیین فاصله قطره چکان‌ها گام‌های مؤثری برداشتند. آنها توانستند روابط نیمه تجربی را برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای و خطی به دست بیاورند. رابطه آنها به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای به فرم زیر می‌باشد:

$$d = 1.32 z^{0.35} q^{0.33} k_s^{-0.33} \quad [2]$$

که q دبی قطره‌چکان، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، d حداکثر قطر و z عمق خاک خیس شده می‌باشد.

زور (۲۰) تحقیقی را به منظور ایجاد و اثبات یک جریان طراحی انجام داد به طوری که قبل از پیاده کردن یک طرح آبیاری قطره‌ای، در ابتدا حجم خاک مرطوب شده را بتوان تخمین زد. در این تحقیق در خاتمه با ترکیب دبی، عمق و قطر خاک خیس شده، حجم خاک خیس شده بر اساس فرمولی که به وسیله شوارتزمن و زور پیشنهاد شده، محاسبه گردید.

داسبرگ و برسلا (۱۲) به منظور به دست آوردن شعاع جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، راه حل تقریبی را برای معادله حرکت آب ارائه نمودند.

رایس و چزنس (۱۴) روش پیشنهاد شده توسط داسبرگ و برسلا را اصلاح نمودند به طوری که تنها پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی شعاع خیس شده خاک عبارت از: آبدهی قطره چکان، بافت خاک و پتانسیل آب خاک بود. آزمایش‌های مزرعه‌ای آنها روی خاک لومی شنی و برای دو مقدار آبدهی (۳/۷۸ و ۷/۵۷ لیتر در ساعت) نشان داد که مقادیر خیس شده پیش‌بینی شده در حدود ۱۱٪ تا ۱۹٪ با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف دارند. هم‌چنین برای مقدار آبدهی ۳/۸ لیتر در ساعت اختلاف بین مقادیر سطح خیس شده پیش‌بینی شده با

باکینگهام است. بر اساس این قضیه اگر n متغیر بعددار در یک معادله همگن ابعادی وجود داشته باشد که به وسیله m متغیر اصلی توصیف می‌شود، می‌توان آنها را به $n-m$ گروه بدون بعد تقسیم کرد (۱۵).

لذا مطابق مطالب بیان شده بر اساس این قضیه می‌توان نوشت:

$$f(d, z, v, q, k_s, t) = 0 \quad [5]$$

که در آن، (d) = حداکثر قطر خاک خیس شده، (z) = عمق خاک خیس شده، (q) = دبی قطره چکان (v) = حجم آب وارد شده به خاک، k_s = هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و (t) = زمان آبیاری می‌باشند.

با ۶ متغیر بعد دار (d, z, v, q, k_s, t) و ۲ بعد اصلی (L, T) ، $n - m = 4$ عدد بدون وجود خواهد داشت که بر اساس قضیه π باکینگهام می‌توان آنها را به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= q^{a_1} k_s^{b_1} d \\ \pi_2 &= q^{a_2} k_s^{b_2} z \\ \pi_3 &= q^{a_3} k_s^{b_3} v \\ \pi_4 &= q^{a_4} k_s^{b_4} t \end{aligned} \quad [6]$$

از آنجا که π_1 بدون بعد است پس به جای بعد آن $L^a T^b$ جایگزین می‌شود با جای گذاری ابعاد q, k_s و d در π_1 و برقراری تساوی $L^a T^b = (L^3 T^{-1})^{a_1} (L T^{-1})^{b_1} L$ ضرایب a_1 و b_1 به ترتیب $0/5$ و $-0/5$ به دست می‌آید. به این ترتیب ضرایب ثابت اعداد بدون بعد π_2, π_3, π_4 نیز به دست می‌آید. از آنجا که π_2, π_3, π_4 بدون بعد بوده و توابعی از z, d, v و t هستند، آنها را به ترتیب با z^*, d^*, v^* و t^* نشان می‌دهیم (معادله ۷).

رابطه بین پارامترهای بی بعد z^*, d^*, v^* در معادله ۷ را می‌توان از نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای به دست آورد. در صورت عدم دسترسی به این نتایج می‌توان از نتایج آزمایشگاهی (مانند باکس‌های شیشه‌ای یا سایر مدل‌های فیزیکی) و یا شبیه‌سازی

مدیریت یک سیستم آبیاری کمک نماید، ضروری به نظر می‌رسد.

تپه‌های شنی و شن‌زارهای استان خوزستان ۵/۴ درصد مساحت استان و ۲۹/۵ درصد اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهد. از طرفی با توجه به تلفات زیاد آب در هنگام آبیاری با روش‌های متداول و به منظور تثبیت این اراضی، جلوگیری از خطرات ناشی از حرکت شن‌های روان و بهره‌برداری کشاورزی و زراعت جنگل در این مناطق، ناگزیر به استفاده از سیستم‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای هستیم (۳).

با توجه به کمبود مطالعات در این گونه مناطق و وجود درصد زیادی از مناطق کشورمان با خصوصیات مشابه این مناطق این پژوهش به منظور دستیابی به روابطی ساده، تجربی و دارای مبنای فیزیکی به منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای انجام پذیرفته است.

به علاوه در این پژوهش سعی شده پارامتر زمان نیز که در مدل شوارتزمن و زور (۱۶) وجود ندارد، در معادلات به دست آمده وارد گردد. بدین ترتیب امکان تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در هر زمان دلخواه پس از شروع آبیاری وجود خواهد داشت.

تئوری تحقیق

برداشت ما از قوانین فیزیکی حاکم بر حرکت آب خاک در اطراف یک منبع نقطه‌ای اینست که شکل هندسی حجم خاک خیس شده در پایان هر آبیاری به نوع خاک، دبی قطره‌چکان (q) و کل حجم آب وارد شده به خاک (V) و زمان آبیاری (t) بستگی دارد.

شکل هندسی پیاز رطوبتی در بهترین حالت به صورت حداکثر قطر (d) و عمق خاک (z) خیس شده بیان می‌شود. نوع خاک به وسیله هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) نشان داده می‌شود.

برای شناخت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده که رابطه بین آنها مشخص شده نیست آنالیز ابعادی روش مناسبی می‌باشد. یکی از قضایای مهم آنالیز ابعادی در مکانیک سیالات قضیه π

عددی استفاده نمود (۱۶).

سانتی متر مکعب (حجم ۰/۰۶۶ متر مکعب) به عنوان مخزن اصلی استفاده شد و برای ثابت نگه داشتن فشار آب نیز از قانون ظروف ماریوت استفاده گردید. در ابتدا قطره‌چکان‌های مورد آزمایش برای رسیدن به دبی‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت تنظیم شدند. بعد از آزمایش‌های اولیه مشخص گردید که در صورت استفاده از میکروتیوب‌ها و تغییر طول و قطر آنها (دبی ۵، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت) و یا با وارد کردن لوله‌های باریک‌تر و پیچ‌دار در داخل لوله‌های میکروتیوب (دبی ۱۰ و ۲۰ لیتر در ساعت)، می‌توان با استفاده از یک هد آب کمتر به راحتی دبی‌های مورد نیاز را تأمین کرد و چون هدف اصلی تأمین دبی‌های مورد نظر بود بیشتر قطره‌چکان‌ها از این نوع انتخاب شدند.

پس از تنظیم کردن قطره‌چکان‌ها در آزمایشگاه، مدل به مزرعه انتقال داده شد و آزمایش‌های مزرعه‌ای برای به دست آوردن الگوهای رطوبتی اجرا گردید. به این ترتیب که برای هر دبی و پس از اتمام هر زمان کاربرد با ایجاد یک برش با دیواره عمودی از محل نصب قطره‌چکان، الگوی خیس شده مشاهده و ابعاد آن اندازه‌گیری شد (شکل ۱). میزان پیشروی رطوبت در راستای افقی روی سطح خاک از محل نصب قطره‌چکان و در راستای عمودی با فواصل ۱۰ سانتی متری قرائت و ثبت گردید. در جدول ۲ مدت زمان کارکرد سیستم به ازای هریک از قطره‌چکان‌ها درج گردیده است.

مقدار عمق جبهه رطوبتی و حداکثر قطر پیزا رطوبتی به ازای هر زمان کارکرد قطره‌چکان، برای انجام محاسبات مربوطه و مراحل بعدی تحقیق انتخاب گردید (جدول ۲ و ۳).

در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه درج شده است. درصد اشباع خاک‌های الباجی بین ۲۴ تا ۲۸ درصد وزنی و وزن مخصوص ظاهری شن‌های روان الباجی ۱/۵۵ و وزن مخصوص حقیقی ۲/۵۶ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۰۵ + ۰/۳ میلی موس بر سانتی متر بوده اسیدپته آن در محدوده ۷/۴ - ۷/۸ و رطوبت اولیه خاک خشک قبل از آبیاری نیز ۱/۷۳ درصد وزنی است. در ضمن

$$\begin{aligned} d^* &= d \left(\frac{k_s}{q} \right)^{1/2} \\ z^* &= z \left(\frac{k_s}{q} \right)^{1/2} \\ v^* &= v \left(\frac{k_s}{q} \right)^{3/2} \\ t^* &= t \left(\frac{k_s}{q} \right)^{3/2} \end{aligned} \quad [7]$$

برای برقراری روابطی بین پارامترهای بدون بعد و ترسیم مقادیر d^* و z^* در برابر v^* ملاحظه شد که می‌توان بین آنها رابطه توانی به صورت زیر برقرار نمود.

$$d^* = A_1 v^{*n_1} \quad [8]$$

که A_1, A_2, n_1, n_2 ضرایب ثابت می‌باشند. با ترکیب معادله فوق با معادله ۷ و جاگذاری ($v = q.t$) روابط زیر به دست می‌آیند:

$$d = A_1 k_s \left(\frac{z}{q} \right)^{n_1} q \left(\frac{z}{q} \right)^{n_1} t^{n_1} \quad [9]$$

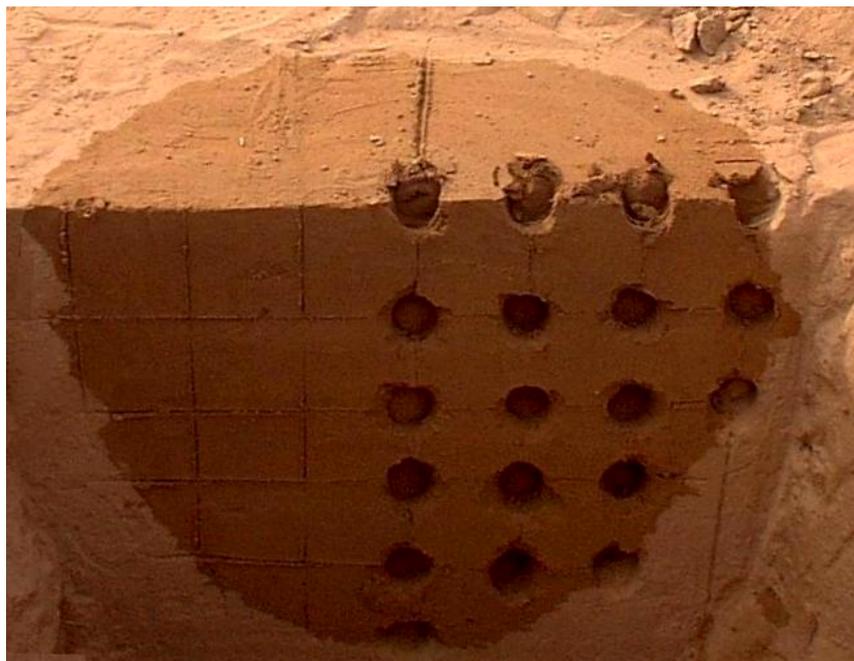
$$z = A_2 k_s \left(\frac{z}{q} \right)^{n_2} q \left(\frac{z}{q} \right)^{n_2} t^{n_2} \quad [10]$$

در معادلات ۹ و ۱۰ عمق و قطر ماکزیمم خاک خیس شده (z, d) تابعی از دبی خروجی (q)، هدایت هیدرولیکی اشباع (k_s) و مدت زمان آبیاری (t) است. A_1, A_2, n_1, n_2 نیز ضرایب ثابت معادله می‌باشند که با استفاده از نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای، آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی عددی به دست می‌آیند.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در آبان ماه سال ۱۳۸۴ در ایستگاه تحقیقاتی منابع طبیعی استان خوزستان، تپه‌های شنی الباجی واقع در ۲۸ کیلو متری جاده اهواز- اندیمشک به عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی در ارتفاع ۲۰ متری از سطح دریا اجرا گردید.

برای انجام این کار از یک مخزن به ابعاد ۳۳×۴۰×۵۰



شکل ۱. پیاز رطوبتی حاصل از قطره‌چکان با دبی ۵ لیتر در ساعت پس از ۵ ساعت کارکرد (۳)

جدول ۱. دانه بندی خاک مورد آزمایش

رس	سیلت	شن خیلی ریز	شن ریز	شن متوسط	شن درشت	عمق نمونه گیری
کمتر از ۰/۰۰۲	۰/۰۰۲-۰/۰۰۵	۰/۰۵-۰/۱	۰/۱-۰/۲۵	۰/۲۵-۰/۵	۰/۵-۱	
۲/۵	۲	۱/۵	۶۵/۵	۲۸	۰	۰-۳۰
۲/۵	۱/۹	۱/۴	۶۵/۵	۲۷/۹	۰	۳۰-۶۰
۲/۴	۲	۱/۵	۶۴/۴	۲۸	۰	۶۰-۹۰
			شنی			بافت

بهترین منحنی، مقادیر پارامترهای ذکر شده به شرح زیر تعیین شد:

$$A_1 = 2/217, n_1 = 0/3272, R^2 = 0/9786 \quad [9] \text{ و } [10]$$

$$A_2 = 1/7812, n_2 = 0/4241, R^2 = 0/9858$$

با اعمال مقادیر فوق در معادلات ۹ و ۱۰ خواهیم داشت:

$$d = 2/22k_s^{(-0/009)} q^{(0/34)} t^{(0/33)} \quad [11]$$

$$z = 1/78k_s^{(0/14)} q^{(0/2)} t^{(0/42)} \quad [12]$$

هدایت هیدرولیکی خاک مورد آزمایش ۰/۴۲ متر بر ساعت می‌باشد (۳).

نتایج

برای تعیین A_1, A_2, n_1, n_2 در معادلات ۹ و ۱۰ مقادیر d^* و Z^* در برابر V^* رسم شده که نمودار آنها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. سپس با استفاده از رگرسیون و برازش

جدول ۲. مقایسه بین مقادیر عمق جبهه رطوبتی اندازه‌گیری (Zo) و برآورد شده (Ze)

ردیف	q(lit/hr)	t(min)	V(m3)	Zo (cm)	Ze (cm)	خطای نسبی (%)
۱	۵	۳۰	۰/۰۰۲۵	۲۴/۵	۲۵/۶	۴/۵
۲	۵	۳۰۰	۰/۰۲۵	۷۰	۶۸	-۳
۳	۵	۴۸۰	۰/۰۴	۷۹	۸۳	۵
۴	۱۰	۶۰	۰/۰۱	۴۲	۴۲	۰
۵	۱۰	۲۴۰	۰/۰۴	۷۴	۷۵/۵	۲
۶	۲۰	۳۰	۰/۰۱	۳۵	۳۸/۲	۹
۷	۲۰	۹۰	۰/۰۳	۵۹	۶۰/۸	۳
۸	۲۰	۱۲۰	۰/۰۴	۷۲	۶۸/۷	-۴/۶
۹	۳۰	۱۰	۰/۰۰۵	۲۵	۲۷	۸/۶
۱۰	۳۰	۳۰	۰/۰۱۵	۴۱	۴۳	۴/۶
۱۱	۳۰	۶۰	۰/۰۳	۵۶	۵۷/۶	۲/۸
۱۲	۳۰	۸۰	۰/۰۴	۷۲	۶۵	-۹/۸
۱۳	۴۰	۱۰	۰/۰۰۶۸	۲۸	۲۹/۵	۵/۳
۱۴	۴۰	۲۰	۰/۰۱۳۲	۴۵	۳۹	-۱۳
۱۵	۴۰	۴۰	۰/۰۲۶۸	۶۰	۵۲/۸	-۱۲
۳/۶						RMSE(cm)
$Ze = 0.9418Zo + 0.0258, R^2 = 0.9622$						نتایج حاصل از رگرسیون

جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده برای (Z) و (d) و میزان خطا در محاسبه آنها درج گردیده است.

بحث

با توجه به جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که مقدار خطای نسبی برای پیش‌بینی ماکزیمم قطر خیس شده بین ۱/۴ تا ۱۴/۳ درصد (میانگین ۵/۸۶ درصد) بوده و در ۸۰ درصد موارد نیز مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشد. مقدار خطای نسبی

بر اساس معادلات ۱۱ و ۱۲ (که معرف شرایط مزرعه‌ای می‌باشند) حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی (m) را می‌توان بر حسب دبی خروجی قطره‌چکان ($\frac{m^3}{s}$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($\frac{m}{s}$) و زمان آبیاری (s) به دست آورد.

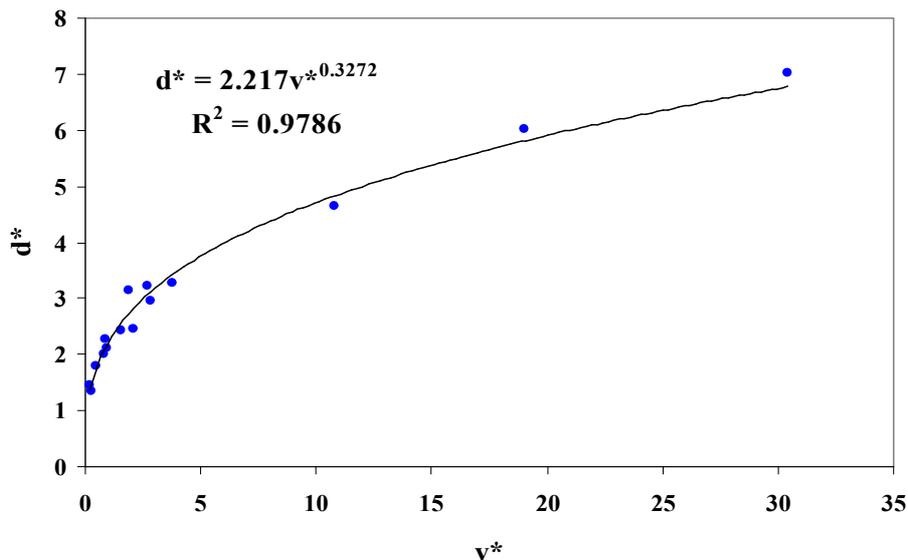
به منظور بررسی نتایج به دست آمده رگرسیون خطی و ضریب هم‌بستگی (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده و هم‌چنین خطای نسبی و ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) (Root mean square error) محاسبه گردید. در

جدول ۳. مقایسه بین مقادیر قطر جبهه رطوبتی اندازه‌گیری (d_0) و برآورد شده (d_e)

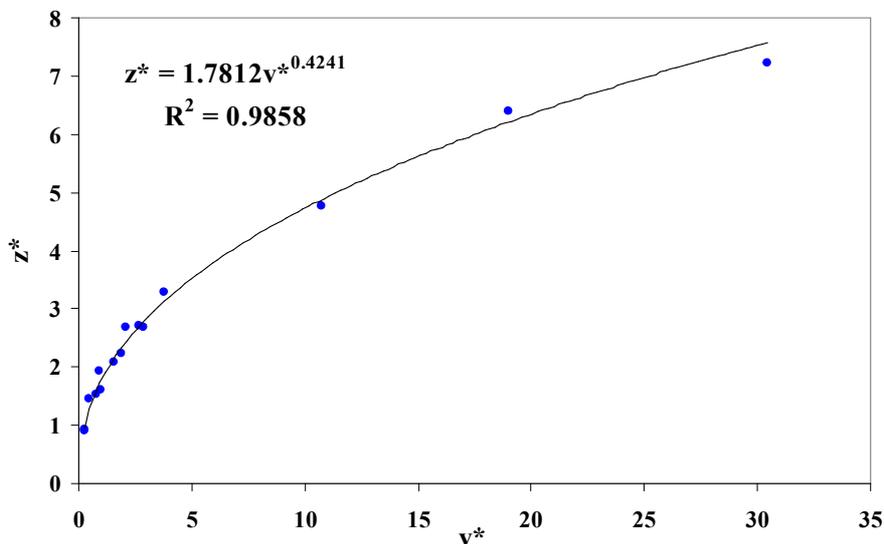
ردیف	q(lit/hr)	t(min)	V(m ³)	d_0 (m)	d_e (m)	خطای نسبی (%)
۱	۵	۳۰	۰/۰۰۲۵	۳۴/۵	۳۰	۱۳
۲	۵	۳۰۰	۰/۰۲۵	۶۶	۶۳/۷	-۳/۵
۳	۵	۴۸۰	۰/۰۴	۷۷	۷۴	۳/۶
۴	۱۰	۶۰	۰/۰۱	۵۰	۴۷/۵	-۵
۵	۱۰	۲۴۰	۰/۰۴	۷۲	۷۴/۷	۳/۸
۶	۲۰	۳۰	۰/۰۱	۴۶	۴۷/۸	۳/۹
۷	۲۰	۹۰	۰/۰۳	۶۵	۶۸/۵	۵/۳
۸	۲۰	۱۲۰	۰/۰۴	۷۲	۷۵/۲	۴/۵
۹	۳۰	۱۰	۰/۰۰۵	۳۶	۳۸/۵	۶/۹
۱۰	۳۰	۳۰	۰/۰۱۵	۵۴	۵۴/۸	۱/۴
۱۱	۳۰	۶۰	۰/۰۳	۶۵	۶۸/۷	۵/۷
۱۲	۳۰	۸۰	۰/۰۴	۶۶	۷۵/۴	۱۴/۳
۱۳	۴۰	۱۰	۰/۰۰۶۸	۴۵	۴۲/۴	-۵/۸
۱۴	۴۰	۲۰	۰/۰۱۳۲	۵۶	۵۲/۷	۶
۱۵	۴۰	۴۰	۰/۰۲۶۸	۷۰	۶۶/۴	۵
۳/۸						RMSE(cm)
de = 1.0708.do - 0.0374, R ² = 0.9367						نتایج حاصل از رگرسیون

شنی به‌دست آوردند. مقدار $RMSE$ نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر، صرف‌نظر از این که کمتر یا بیشتر باشد، وجود دارد. مقدار $RMSE$ ، ۳/۸ سانتی‌متر برای ماکزیمم قطر تخمین زده شده و همین‌طور ۳/۶ سانتی‌متر برای ماکزیمم عمق جبهه رطوبتی در برابر ۱۰ سانتی‌متری که ترابی و صدرقائن (۱) به‌دست آورده‌اند، دلالت بر دقت بالای این مدل در پیش‌بینی ابعاد پیاز رطوبتی دارد.

در محاسبه ماکزیمم عمق جبهه رطوبتی نیز بین ۰ تا ۱۳ درصد (به‌طور میانگین ۵/۸۵ درصد) بوده که در ۶۰ درصد موارد مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر از موارد واقعی بوده است. این مقادیر خطای خیلی کمتر از حداکثر ۳۰ درصد خطای به‌دست آمده توسط ترابی و صدرقائن (۱) در بافت‌های مختلف خاک می‌باشد. البته آنها نیز حداقل صفر درصد خطا را در محاسبات خود به‌دست آوردند. همین‌طور کمتر از ۱۱ تا ۱۹ درصد خطایی است که رایس و چزنس (۱۴) برای پیش‌بینی شعاع خیس شده توسط یک قطره‌چکان در خاکی با بافت لومی



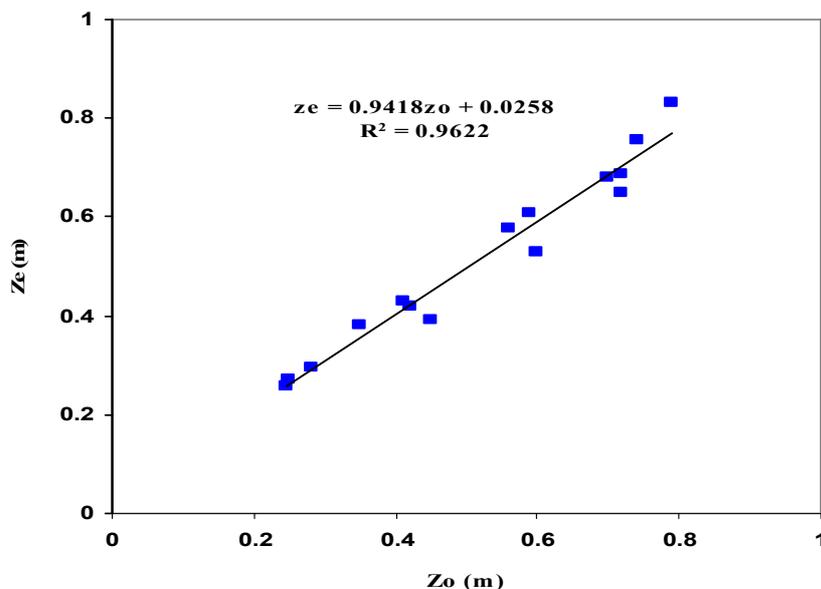
شکل ۲. رابطه بین اعداد بدون بعد v^* و d^*



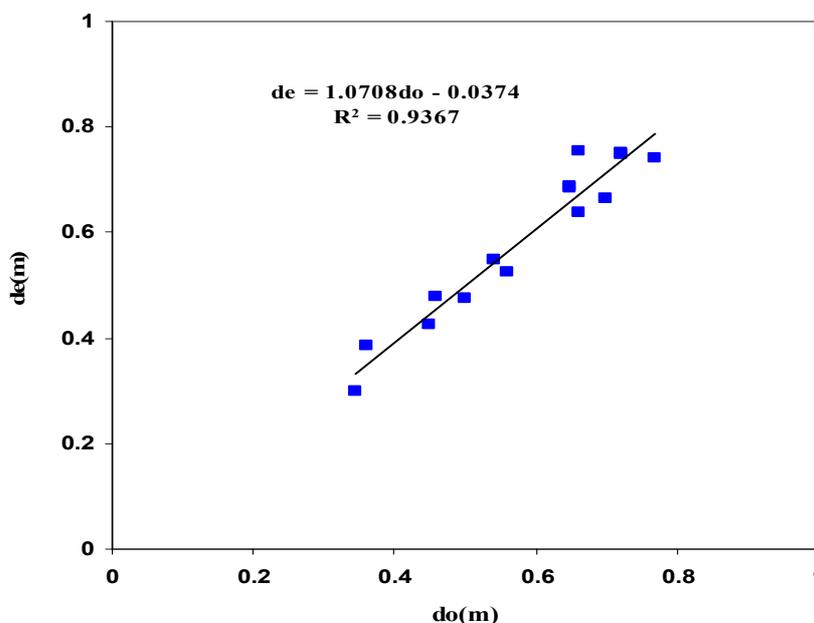
شکل ۳. رابطه بین اعداد بدون بعد v^* و Z^*

هر دو مورد) (۱۶) اختلاف جزئی وجود دارد و کفایت بالای مدل در پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر را بیان می‌کند. دلیل این اختلاف در مقدار R^2 که در رابطه رگرسیونی بین d^* و Z^* در برابر V^* نیز دیده می‌شود آن است که روابطی را که آنها به دست آورده‌اند، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی (۵) و یا شبیه‌سازی عددی (۱۶) می‌باشد که طبیعتاً در برابر نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی الگوهای منظم‌تر و جواب‌های دقیق‌تری به دست می‌آید در حالی که نتایج حاصل از کارهای میدانی عملی‌تر و کاربردی‌ترند.

مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده قطر و عمق خیس شدگی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود ضریب هم‌بستگی قطر خیس شده اندازه‌گیری شده (d_e) و قطر خیس شده برآورد شده (d_p)، 0.9367 بوده (شکل ۵) و ضریب هم‌بستگی عمق خیس شدگی اندازه‌گیری شده (Z_e) و برآورد شده (Z_p) نیز 0.9622 (شکل ۴) می‌باشد که در برابر ضرایب درج شده توسط میرزایی و همکاران (به ترتیب 0.999 برای d و 0.992 برای Z) (۵) و شوارتزمن و زور (0.99 برای



شکل ۴. رابطه بین عمق اندازه‌گیری شده (Z_0) و برآورد شده (Z_e)



شکل ۵. رابطه بین قطر اندازه‌گیری شده (d_o) و برآورد شده (d_e)

نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات موجود برای تعیین شکل پیاز رطوبتی (انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای و عدم امکان استفاده از مدل‌های عددی)، نتایج به‌دست آمده دلالت بر امکان موفقیت‌آمیز از روابط به‌دست آمده دارد و می‌توان از نتایج حاصله در انتخاب

قطره‌چکان‌ها و تعیین فاصله بین قطره‌چکان‌ها به‌منظور طراحی و مدیریت بهینه سیستم آبیاری قطره‌ای در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. علاوه بر این، تهیه جداولی مشابه جدول کلر و همکاران با استفاده از روابط به‌دست آمده به طراحان سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کمک شایانی می‌نماید (۴).

منابع مورد استفاده

۱. ترابی، م. و ح. صدرقائن. ۱۳۸۲. ارزیابی یک مدل نیمه تجربی برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی و فاصله قطره چکان‌ها. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۴(۱۷): ۱۵-۲۷.
۲. خانجانی، ج. و غ. بارانی. ۱۳۷۵. بررسی توزیع رطوبت خاک زیر قطره چکان آبیاری قطره‌ای. مجموعه مقالات ششمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۳. عباس پلنگی، ج. ۱۳۸۵. تعیین الگوهای پیشروی رطوبتی در خاک‌های شنی، تحت منبع نقطه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد و آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. عزیزاده، ا. ۱۳۸۴. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد.
۵. میرزایی، ف.، ع. لیاقت، ت. سهرابی و م. امید. ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۶(۲۳): ۵۳-۶۶.
۶. نجفی مود، م. ۱۳۸۴. طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار (ترجمه). مؤسسه چاپ دانشگاه فردوسی، مشهد.
7. Angelakis, A. N., D. E. Rolstin, T. N. Kadir and V.H. Scott. 1993. Soil water distribution under trickle source. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 119(30):767-774.
8. Armstrong, C., R. Fletcher and T. V. Wilson. 1983. Computer model for moisture distribution in started soils under trickle source. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 26:1704-1709.
9. Assouline, S. 2002. The effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1630-1636.
10. Brandt, A., E. Bresler, N. Diner, I. K. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg. 1971. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am.* 35:683-689.
11. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle-irrigation with application to design problems. *Irrig. Sci.* 1:13-17.
12. Dasberg, S. and E. Beresler. 1985. Drip irrigation manual. International Irrigation Information Center, Bet Dagen, Israel.
13. Meshkat, M., R. C. Warner and S. R. Workman. 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 125(6): 315-323.
14. Risse, L. M. and J. L. Chesness. 1989. A single simplified design procedure to determinate the wetted radius for a trickle emitter. *Trans. ASCE.* 32(6):1909-1913
15. Robert, L. and Y. Daugherty. 1977. *Fluid Mechanics, with Engineering Applications.* McGraw-Hill Book Co. USA.
16. Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 112(3): 242-253.
17. Skaggs, T. H., T. J. Trout., J. Simunek and P. J. Shose. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130(4):304-310.
18. Tan, T. S., K. K. Phoon and P. C. Chong. 2004. Numerical study of finite element method based solutions for propagation of wetting fronts in unsaturated soil. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 130(3):254-263.
19. Warrick, A. W. 1974. Time-dependent linearized infiltration, I: point-sources. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.* 38(3):383-386
20. Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 16:101-105.